

# ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ КАТАГЕНЕЗА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОВЕДЕНИЯ ВНУТРИПЛАСТОВОГО ПИРОЛИЗА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПОРОД БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ

А.С. Мазурова<sup>1</sup>, М.В. Субботина<sup>1</sup>, А.М. Горшков<sup>2</sup>, И.С. Хомяков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

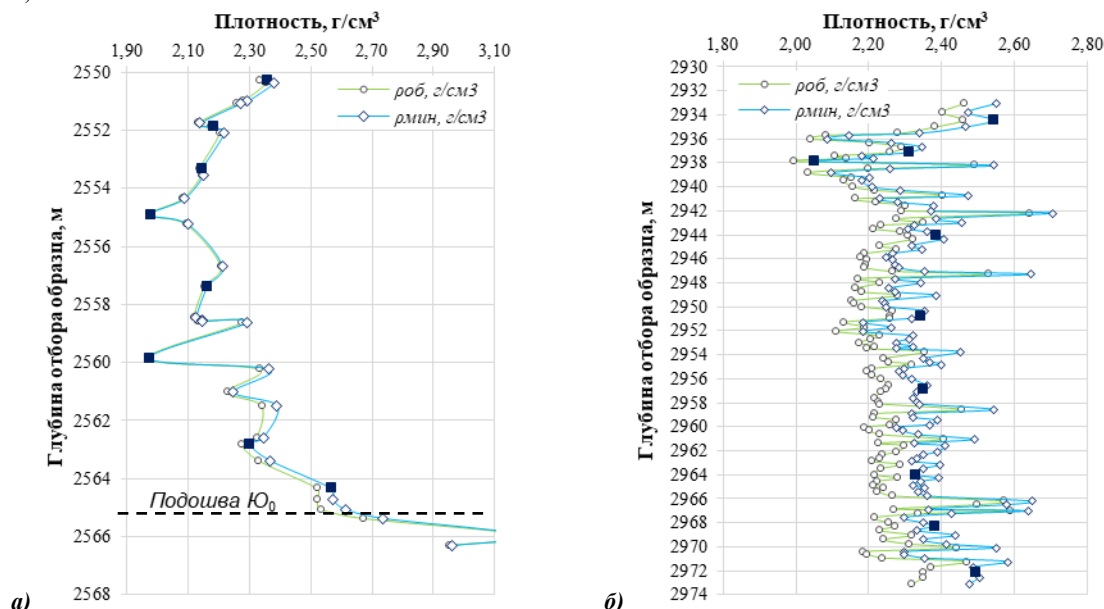
<sup>2</sup>АО «Геология», г. Новосибирск, Россия

Самыми эффективными с точки зрения выработки запасов керогеносодержащих сланцевых пород являются тепловые методы, позволяющие под действием высоких температур превращать кероген в жидкие и газообразные углеводороды, а также формировать микро и макротрещиноватость матрицы сланцевых пород, что позволяет повысить коэффициент извлечения нефти и газа за счет увеличения дренируемых зон. В целом технология добычи нефти из сланцевых формаций термическими методами может проходить двумя способами: поверхностный ретортинг (surface retorting) и внутрипластовый ретортинг (in-situ retorting) [7]. С точки зрения энергоэффективности наиболее предпочтительным для условий Западной Сибири является внутрипластовый ретортинг, при котором кероген с помощью внутрипластового нагрева превращается в синтетическую нефть и газ, которые могут быть извлечены на поверхность с использованием традиционных способов добычи.

Внутрипластовый пиролиз является довольно «молодым» в России, поэтому основные научные центры (Сколковский институт науки и техники, ВНИИнефть и т.д.) только начинают проводить лабораторные исследования моделирования тепловых методов для выявления основных закономерностей влияния температурной обработки на физико-химические свойства образующейся нефти и коллекторские свойства пород баженовской свиты разного литологического состава и разной степени зрелости органического вещества. На решение одной из этих проблем и будет направлена данная работа.

**Целью** данной работы являлось исследование влияния температурной обработки горных пород баженовской свиты разной степени катагенетической зрелости органического вещества на коэффициент извлечения углеводородов и фильтрационно-емкостные свойства слагающих пород для подбора оптимальной температуры проведения внутрипластового пиролиза.

Для выполнения поставленной цели были отобраны образцы горных пород баженовской свиты, вскрытой разведочной скважиной Орехово-Ермаковского нефтяного месторождения и эксплуатационной скважиной Приобского нефтяного месторождения. Всего было отобрано 17 образцов керна равномерно по всему разрезу баженовской свиты в указанных скважинах. Значения кажущейся минералогической плотности исследуемых образцов керна варьируются от 1,97 до 2,76 г/см<sup>3</sup> и определяются, в основном, содержанием органического вещества (рис. 1).

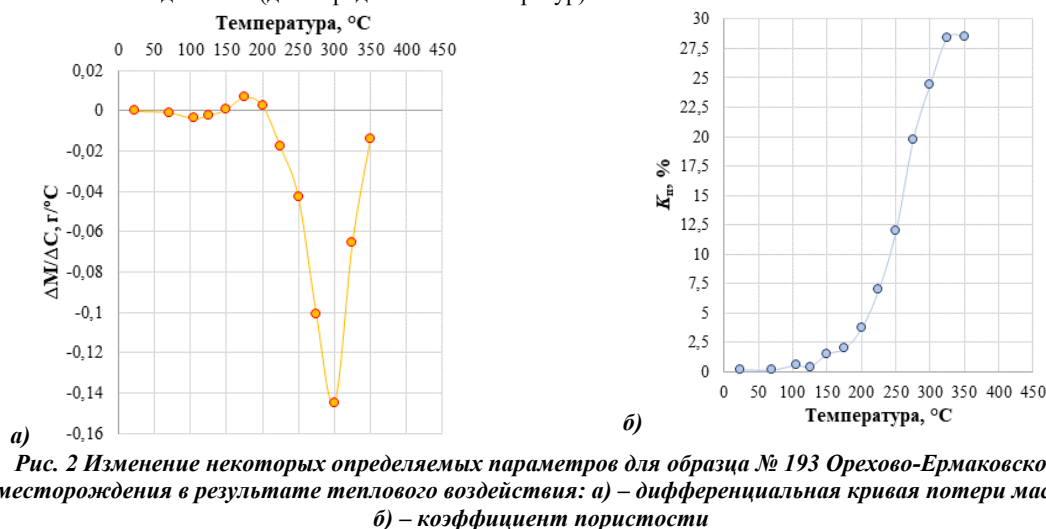


**Рис. 1** Изменение объемной и кажущейся минералогической плотности образцов керна баженовской свиты: а) – разрез, вскрытый разведочной скважиной Орехово-Ермаковского месторождения; б) – разрез, вскрытый эксплуатационной скважиной Приобского месторождения. На графике квадратами выделены образцы, отобранные для проведения исследования.

Сущность лабораторных экспериментов по исследованию влияния тепловой обработки на породы баженовской свиты заключалась в постепенном нагреве измельченных образцов керна в кислородной среде сначала в сушильном шкафу при температуре от 70 до 200 °С и затем в муфельной печи до 350 °С. Время тепловой обработки составляло 24 часа во всех экспериментах. После каждой ступени нагрева исследуемые образцы охлаждались до комнатной температуры и определялись следующие основные параметры:

- масса образцов для расчета потери массы после каждой ступени теплового воздействия и построения дифференциальной кривой (рис. 2);

- петрофизические свойства: кажущаяся минералогическая плотность, коэффициент пористости (рис. 2) и кажущаяся проницаемость по газу;  
- значения пиков S1 и S2 для оценки степени реализации генерационного потенциала баженовской свиты после теплового воздействия (для определенных температур).



**Рис. 2** Изменение некоторых определяемых параметров для образца № 193 Орехово-Ермаковского месторождения в результате теплового воздействия: а) – дифференциальная кривая потери массы; б) – коэффициент пористости

Для определения петрофизических свойств образцов керна баженовской свиты использовался подход «Gas Research Institute» [3, 4], который заключается в измельчении образца горной породы для ускорения процесса подготовки керна (экстракция) и повышения достоверности определения объема минерального скелета. Перед началом исследования полноразмерный керн дробился и просеивался на ситах с размером ячеек 5 и 2 мм для получения однородной по размеру фракции. Масса исходной навески для каждого образца составляла около 40 грамм. Определение объемной плотности измельченных образцов керна осуществлялось модифицированным методом жидкостенасыщения, разработанным специально для ультранизкопроницаемых горных пород [5]. Стоит отметить, что объемная плотность керна определялась для образцов с естественной насыщенностью один раз при комнатной температуре и считалось, что объемная плотность не меняется при тепловом воздействии. Кажущаяся минералогическая плотность горных пород определялась газовольметрическим методом на газовом пикнометре ПИК-НАНО-НСФ (АО «Геологика»). Коэффициент пористости рассчитывался по значениям объемной и кажущейся минералогической плотности. Кажущаяся проницаемость по газу (гелию) горных пород баженовской свиты определялась на измельченных образцах керна согласно методу «Pressure Pulse Testing» [1-4] на матричном пермеаметре ПИК-НАНО-НСФ (АО «Геологика»). В основе метода лежит аппроксимация многопараметрической экспоненциальной функцией экспериментальных данных падения давления, которое возникает из-за проникновения гелия в микропоры отдельных частиц измельченного керна, и последующее вычисление кажущейся проницаемости по газу по параметрам полученной кривой [1-4].

Степень реализации генерационного потенциала баженовской свиты после теплового воздействия определялась методом Rock-Eval [6]. В основе метода Rock-Eval лежит термическое моделирование эволюции нефтематеринской породы. Эксперимент заключается в следующем: навеска измельченной горной породы размерностью (<0,5 мм) массой 10-100 мг нагревается в токе инертного газа (или азота) от 300 до 650 °C. Вначале при постоянной температуре 300°C в печи пиролиза происходит испарение свободных углеводородов (пик S1). После начинается постепенное увеличение температуры до 650 °C в результате чего наблюдается термическое разрушение керогена, сопровождающееся выделением газообразных и жидких углеводородов (пик S2). Пик S2 при определенной температуре обработки образцов керна баженовской свиты характеризует остаточный генерационный потенциал. Зная исходное значение генерационного потенциала баженовской свиты можно оценить степень реализации генерационного потенциала при определенной температуре теплового воздействия.

В результате проделанной работы можно сделать вывод, что при нагреве образцов керна баженовской свиты Орехово-Ермаковского и Приобского месторождения при температуре от 225 до 325 °C наблюдается высокая степень реализации генерационного потенциала баженовской свиты (до 90%) а также существенный рост коэффициента пористости (в несколько раз) и кажущейся проницаемости по газу (на несколько порядков). Оптимальной температурой проведения внутрипластового пиролиза в кислородной среде для образцов керна баженовской свиты исследованных месторождений является 300 °C.

#### Литература

1. Gorshkov A.M., Kudryashova L.K., Lee-Van-Khe O.S. Petrophysical rock properties of the Bazhenov Formation of the South-Eastern part of Kaymysovsky Vault (Tomsk Region) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – Vol. 43: Problems of Geology and Subsurface Development. – Tomsk, 2016. – 012010, 6 p.
2. Gorshkov A.M. Permeability measurements of Bazhenov Formation rocks on plugs and crushed core // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 272: International science and technology conference «Earth science». – 032005, 8 p.
3. GRI-95/0496 Development of Laboratory and Petrophysical Techniques for Evaluating Shale Reservoirs/ Final technical report. – Gas Research Institute. Chicago, Illinois. October 1986 – September 1993.

4. Luffel D.L., Hopkins C.W. Matrix Permeability Measurement of Gas Productive Shales. SPE Annual Technical Conference and Exhibition (3–6 October, Houston, Texas, USA). SPE 26633-MS, – 1993.
5. Горшков А.М. Методика определения пористости ультранизкопроницаемых пород баженовской свиты на дезинтегрированном керне // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 12. – С. 129 – 133.
6. Тиссо Б., Вельте Д. Образование и распространение нефтей. Пер. с англ. Под ред. Н.Б. Вассоевича, Р.Б. Сейфуль-Мулюкова. – М.: Мир, 1981. – 368 с.
7. Цветков Л.Д., Цветкова Н.Л. Сланцевая нефть России // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2013. – №5 (16). – С. 219 – 230.

## СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ЭКСТРАКЦИИ НИЗКОПРОНИЦАЕМОГО КЕРНА

В.В. Малинин

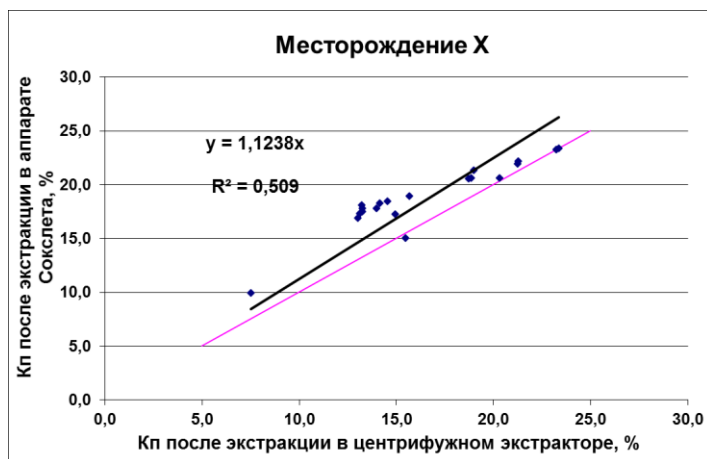
Научный руководитель - главный специалист лаборатории физики пласта И.А. Кузнецов  
АО «ТомскНИПИнефть», г. Томск, Россия

Общеизвестно, что наиболее объективное и детальное представление о физических свойствах пород можно получить в результате исследования образцов горной породы лабораторными методами. И только после бурения достаточного числа скважин и проведения соответствующих исследований для этой цели используют методы промышленной геофизики. Понятно, что для качественных связей керн-ГИС необходимо обеспечить высокую достоверность результатов лабораторных исследований.

При проведении лабораторных исследований большое внимание уделяется пробоподготовке: чем качественнее будет проведен этот этап, тем достовернее будет конечный результат. В работе приведены результаты сравнительных исследований полноты экстракции образцов керна двумя различными методами.

В Лаборатории физики пласта АО «ТомскНИПИнефть» (ЛФП) применяются в основном 2 метода экстракции: экстракция в аппаратах Сокслета (длительный метод экстракции) и экстракция в центрифужном экстракторе (экспресс метод).

В качестве растворителя для аппаратов Сокслета в ЛФП применяется толуол. Горячая экстракция толуолом в аппаратах Сокслета занимает продолжительное время (от нескольких недель, до нескольких месяцев). Критерием завершения очистки служит визуальная оценка степени загрязнения растворителя на основе сопоставления цвета растворителя с типовой шкалой, т.е. субъективное решение оператора [1]. В связи с высокой загрузкой лаборатории керновыми исследованиями, необходимо сокращение времени экстракции образцов горной породы. В этой связи во многих лабораториях используют центрифужный экстрактор для сокращения времени экстракции.



**Рис. 1** Корреляционная зависимость пористости образцов керна месторождения X- после центрифужного экстрактора и комбинированной очистки в центрифужном экстракторе и в аппаратах Сокслета. Розовым цветом показана линия с единичным наклоном

дополнительной экстракции в течении 2 недель в аппарате Сокслета были построены корреляционные зависимости. Сравнительный анализ двух методов экстракции на образцах горной породы месторождения X показал, что значения пористости, полученные на экстрагированных в центрифужном экстракторе образцах горной породы, смещены относительно линии с единичным наклоном (рисунок 1).

Качественная оценка двух методов экстракции показывает различие полноты экстракции образцов горной породы. Необходима новая методика для оперативного экстрагирования низкопроницаемых образцов горной породы с количественной оценкой остаточного содержания углеводородов (УВ) в поровом пространстве.

В связи с этим была поставлена задача: подготовка методики оперативной экстракции низкопроницаемых образцов горной породы с количественной оценки полноты извлечения углеводородов из горной породы. Для

В центрифужных экстракторах растворитель проходит через образец горной породы, вымывая из порового пространства УВ и пластовую воду. Метод экстрагирования с помощью центрифужного экстрактора относится к экспресс-методу. Рекомендуемая длительность процесса составляет не менее 4 часов [2]. В центрифужных экстракторах обычно используют спиртобензольную смесь.

Проведены сравнительные исследования двух методов очистки низкопроницаемых образцов месторождения X. Образцы горной породы проэкстрагированы в центрифужном экстракторе, затем определена их пористость по газу [1,3,4]. На следующем этапе образцы дополнительно экстрагировали в аппаратах Сокслета толуолом в течение 2 недель. Повторно определяли пористость по газу. По полученным значениям пористости, после экстракции в центрифужном экстракторе и